



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra zemědělské, dopravní a manipulační techniky

Diplomová práce

Porovnání pevnostních charakteristik filamentů
ovlivněných prostředím

Autor práce: Bc. Jan Čech

Vedoucí práce: Mgr. Zbyněk Havelka, Ph.D.

České Budějovice
2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval(a) pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....

Bc. Jan Čech

Abstrakt

Cílem diplomové práce je vytvořit modely za pomoci 3D tisku z různých materiálů filamentu, následně je vystavit vybraným vlivům prostředí a zhodnotit jejich pevnostní charakteristiky.

Diplomová práce obsahuje v teoretické části stručné shrnutí metod 3D tisku a jeho parametrů. Dále popis vlastností materiálů, které byly v práci použity. Konkrétně se jedná o materiály Akrylonitril butadien styren (ABS), Akrylonitril styren akrylát (ASA), Polylactic acid (PLA) a Kopolyester (PETG). Praktická část je zaměřena na vytvoření modelů pomocí 3D tisku a na výzkum vlivu prostředí na tyto modely. Pokusy jsou prováděny v prostředích s pokojovou teplotou, sníženou teplotou, zvýšenou teplotou a s UV zářením. Po těchto pokusech jsou modely podrobeny tahové zkoušce a následně jsou výsledky z této zkoušky porovnány. V diskusi práce jsou zhodnoceny výsledky a některé problémy z celého experimentu.

Klíčová slova: 3D tisk, ABS, ASA, PLA, PETG, tahová zkouška, různá prostředí

Abstract

The thesis aims to create models using 3D printing from different filament materials, then expose them to selected environmental influences and evaluate their characteristic strength.

This thesis contains a concise summary of 3D printing methods and their parameters in the theoretical part. Furthermore, a description of the properties of the materials used in the work. Specifically, the materials are acrylonitrile butadiene styrene (ABS), acrylonitrile styrene acrylate (ASA), Polylactic acid (PLA) and Copolyester (PETG). The practical part aims to create models using 3D printing and research the impact of the environment on these models. Experiments are conducted in room temperature, reduced temperature, elevated temperature, and UV radiation environments. Following these experiments, the models are subjected to a traction test and the results of this test are then compared. In the discussion part of the thesis, the results and some problems from the whole experiment are thereafter evaluated.

Keywords: 3D printing, , ABS, ASA, PLA, PETG, tensile test, different environments

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Mgr. Zbyňku Havelkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích za poskytnutí materiálů pro tvorbu 3D modelů a stroje pro jejich následné otestování. V neposlední řadě chci poděkovat panu Martinu Burianovi za poskytnutí 3D tiskárny, jeho čas a velmi cenné rady.

Obsah

Úvod	7
1 Technologie 3D tisku	8
1.1 Fused Filament Fabrication (FFF)	8
1.2 Druhy filamentů	9
1.2.1 Polylactic acid (PLA)	9
1.2.2 Kopolyester (PETG)	10
1.2.3 Akrylonitril butadien styren (ABS)	11
1.2.4 Akrylonitril styren akrylát (ASA)	12
1.3 Parametry FFF tisku	13
1.3.1 Teplota trysky	13
1.3.2 Teplota podložky	13
1.3.3 Výška vrstvy (Layer height)	13
1.3.4 Perimetry	13
1.3.5 Podpěry (Supports)	14
1.3.6 Výplň (Infill) a její struktura	14
2 Tahová zkouška	15
2.1 Mez kluzu	16
2.2 Mez pevnosti	16
2.3 Zkušební trhací stroj	16
2.4 Vyhodnocení tahové zkoušky	17
2.5 Pracovní diagram	18
3 Metodika	20
4 Výsledky	24
4.1 Výstupní kontrola	24
4.2 Tahová zkouška	26
4.2.1 ABS	26
4.2.2 ASA	28
4.2.3 PETG	29
4.2.4 PLA	30
5 Diskuse	32
Závěr	39

Seznam použitých zdrojů	41
Seznam obrázků	43
Seznam tabulek	44

Úvod

3D tisk je znám již od roku 1980. Tehdy poprvé tuto technologii popsal v Japonsku pan Hideo Kodama. Popsal způsob, jak urychlit návrhy a výrobu prototypů. Vymyslel technologii, která pomocí UV záření vytvrzuje fotocitlivý roztok. Tuto technologii si v roce 1984 patentoval pan Chuck Hull, pod názvem stereolitografie (SLA). Postupem času přibývaly další patenty a objevovaly se nové technologie tisku. Například pan Carl Deckard patentoval technologii SLS (Selectiv Laser Sintering technologii) a v roce 1992 firma Stratasys patentovala technologii Fused Deposition Modeling (FDM), která je dnes známější pod názvem Fused Filament Fabrication (FFF). Za necelých 10 let tedy byly objeveny a patentovány tři nejrozšířenější technologie pro 3D tisk.

Velice důležitým rokem pro 3D tisk se stal rok 2009. Tehdy vypršela platnost patentu technologie FMD. To odstartovalo prudký rozvoj inovací u FDM tiskáren. Zároveň v tuto dobu vznikl open-source projekt RepRap (replicating rapid prototyper). Tento projekt umožnil sdílení návodů a rad mezi uživateli. Například poskytuje návod, jak si sestavit svoji 3D tiskárnu. Je zde možné najít i různá vylepšení na 3D tiskárny. Ve stejnou dobu přišel na scénu pan Josef Průša se svou firmou Prusa Research s.r.o. a zanedlouho se stal světovou špičkou na trhu 3D tiskáren. Dokázal tiskárny zmenšit a hlavně zlevnit. Tím se mu povedlo ve velké míře rozšířit 3D tisk mezi populaci. Jeho tiskárny se umí částečně replikovat, tzn. tisknout součástky na další tiskárny, a také tak činí. Ve firmě má svou farmu, která obsahuje přes 300 FFF tiskáren, které tiskou součástky na další 3D tiskárny.

V dnešní době je 3D tisk již velmi rozšířeným odvětvím a jedná se nadále o velmi rychle se rozvíjející oblast. Velké množství firem využívá 3D tisk ve výrobních procesech. Využívá se i v moderním zdravotnictví, kde je tato technologie díky nízkým nákladům a velké flexibilitě tvarů a materiálů nenahraditelná. Dále se dnes dají tisknout pomocí speciálního betonu i domy.

Tato diplomová práce navazuje na autorskou bakalářskou práci, která se zabývá zjišťováním pevnostní charakteristiky 3D modelů při použití dvou různých materiálů a různých poloh tisku. Jedná se konkrétně o materiály PLA a PETG. Dále je porovnávána horizontální a vertikální poloha tisku při různé výšce vrstev, tisknutých pomocí FFF tiskárny. Z této práce budou použity některé výsledky a bude z nich vycházeno. Cílem předkládané diplomové práce je zjistit rozdíly v pevnostních charakteristikách u modelů z vybraných materiálů, které budou vystaveny působení vybraných vlivů prostředí. Jedná se o nej-používanější tiskové materiály, konkrétně tedy PLA, PETG, ABS a ASA. Výsledek práce by měl pomoci ostatním uživatelům 3D tiskáren jak s výběrem materiálu při svém projektu, tak i s volbou prostředí, kterému je vhodné materiál následně vystavit tak, aby se jeho vlastnosti například zlepšily, popřípadě kterému prostředí se raději vyhnout.

1 Technologie 3D tisku

U 3D tisku mají všechny technologie stejný princip. Tím je postupné nanášení vrstev na sebe neboli aditivní technologie. Pro vhodný výběr typu tiskárny je zapotřebí zvážit několik faktorů: co se bude tisknout, z jakého materiálu, finanční náročnost pořízení tiskárny, finanční náročnost tisku, složitost modelu, časovou náročnost tisku a potřebnou kvalitu detailů. Nejrozšířenější technologie 3D tisku můžeme rozdělit podle toho, jaký používáme tiskový materiál a jak ho budeme zpracovávat. (Kloski a Kloski, 2017).

Popsána je zde pouze technologie FFF, která bude v diplomové práci použita. Zbylé dvě nejrozšířenější technologie tisku (SLA, SLS) jsou popsány v bakalářské práci (Čech, 2020).

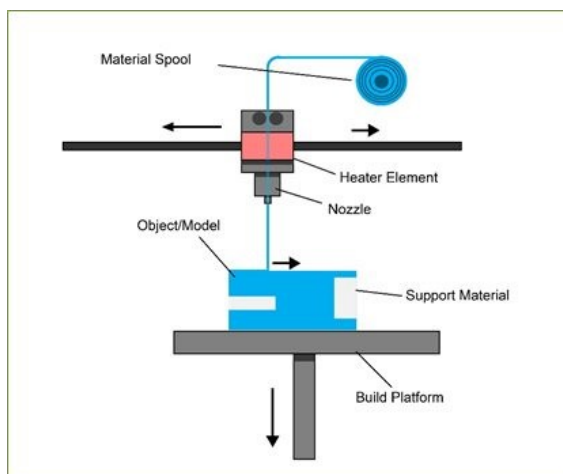
1.1 Fused Filament Fabrication (FFF)

Technologie FFF někdy také bývá nazývána FDM (Fused Deposition Modeling). Pan Josef Průša ve své knize Základy 3D tisku (Prusa, 2016) uvádí, že se v dnešní době jedná o nejrozšířenější a zároveň nejdostupnější technologii 3D tisku. Je rozšířena hlavně díky své jednoduchosti a nízké ceně provozu. Mezi její nevýhody patří horší kvalita zpracování detailů. Aby se kvalita zlepšila, je možné zvětšit počet tisknutých vrstev. To se ovšem negativně promítne na delší době tisku a větší spotřebě materiálu. Současné tiskárny tohoto typu jsou následovníky projektu RepRap (Prusa, 2016).

Technologie FFF využívá roztavených termoplastických polymerů (filament), které jsou tiskovou hlavou, za pomoci trysky, ve vrstvách nanášeny na tiskovou podložku ve tvaru zvoleného modelu (Jones et al., 2011).

Na obrázku 1.1 (O’Neal, 2019) je popsána FFF tiskárna, která se skládá z extruderu (tisková hlava) a vyhřívané platformy (tisková podložka). Tisková hlava je vybavena tryskou, v níž se taví filament. Podle typu konstrukce tiskárny se platforma při tisku pohybuje vertikálně nebo horizontálně. U této technologie lze za pomoci vylepšeného extruderu tisknout z více materiálů najednou (Jones et al., 2011; Redwood et al., 2017).

Filament je nejdříve upevněn do držáku u tiskárny. Tiskárna se zapne a nechá se nažhavit extruder. Po jeho nažhavení na potřebnou teplotu pro správné tavení filamentu se zavede filament do extruderu. Extruder se pohybuje v osách X, Y, a Z. Pohyb je zajištěn krokovými motorky. V extruderu se filament roztaví na předem nastavenou teplotu, podle materiálu použitého k tisku a je přes trysku vytlačován ve slabých vrstvách na platformu. Zde chladne a postupně tuhne. Když je extruderem vrstva dokončena, celý tisknutý model na platformě se posune, aby mohl extruder začít vytvářet další vrstvu. Posunutí je dosaženo buď zvednutím extruderu, nebo klesnutím platformy, záleží na konstrukci tiskárny. Tento



Obrázek 1.1: *Princip FFF tisku,*

způsob pokládání vrstev na sebe se opakuje do té doby, než je celý model vytisknut (Císař, 2019; Horne a Hausman, 2017).

V FFF tiskárně lze tisknout nepřeberným množstvím filamentů různých barev. Nevýhodou také je, že tato technologie vyžaduje tvorbu podpor při tisku, a to především u modelů, které disponují převislou a složitou geometrií. Podpory se pak odstraňují ručně, což může ovlivnit finální estetický dojem celého modelu (Prusa, 2016).

1.2 Druhy filamentů

V této kapitole je pozornost věnována pouze vybraným materiálům pro technologii FFF. Technologie využívá k vytvoření modelu tiskovou strunu, která se nazývá filament. Filament má kruhový průřez, nejčastěji o průměru 1,75 mm a je namotaný na cívce. V současné době trh nabízí velké množství barev a druhů od různých výrobců. Velice různorodá je i kvalita a cena nabízených filamentů. Právě kvalita filamentu ve velké míře ovlivňuje finální model (Císař, 2019).

1.2.1 Polylactic acid (PLA)

PLA je polymer, který je vytvořený z kyseliny polymléčné. Tento materiál je mezi tiskaři nejpoužívanějším a zároveň i nejoblíbenějším. Především kvůli snadnému a bezproblémovému tisku. Nevyžaduje vysokou teplotu tisku ani vyhřívanou podložku. Je velice levný a má obстойné mechanické vlastnosti. První zmínka o syntetickém PLA vlákne je již z roku 1932. Okolo roku 1955 se začala vlákna pokusně používat pro výrobu chirurgických nití a implantátů. První komerčně vyrobené vlákno bylo v roce 1997 vyrobeno ve Francii a neslo název Deposa (Homola, 2013).

Teplota tání materiálu je poměrně nízká. Pohybuje se v rozmezí mezi 170 °C a 200 °C. Zároveň má malou tepelnou roztažnost, proto jeho tisk nekomplikuje příliš velké kroucení a odlepování modelu od podložky. Je vyráběn z kukuřičného škrobu, díky tomu je právem označován za nejšetrnější materiál pro 3D tisk. Zároveň je biologicky rozložitelný a kompostovatelný. Ke správnému rozložení však vyžaduje kompostování za vyšších teplot

- nelze ho likvidovat v běžných kompostech. Jako určitou výhodu lze brát i to, že při tisku příjemně voní. Vůně většinou připomíná popcorn (Prusa, 2016).

Mezi nevýhody materiálu PLA patří nízká tepelná odolnost, měkne již při teplotě okolo 60 °C. Zároveň není odolný vůči UV záření, viz. tabulka č. 1.1. Tím pádem bez nějakého dalšího ošetření např. barvou nebo lakem nemůže být umístěn ve venkovním prostředí. Je tedy vhodný spíše pro testovací a kalibrační objekty, popřípadě pro výrobky, které jsou určené pro použití ve vnitřních prostorech. Mezi jeho vlastnosti patří tvrdost, ale i křehkost. Při namáhání se neohýbá, ale rovnou praská. Tento materiál je detailněji popsán v bakalářské práci autora (Čech, 2020; Homola, 2013).

Tabulka 1.1: Základní vlastnosti materiálu PLA

Výhody	Nevýhody
Snadný tisk	Křehkost
Tiskne drobné detaily	Nízká teplotní odolnost
Vhodné na tisk velkých modelů	Obtížnější post-processing
Tvrdost a houževnatost	
Nedeformuje se	

1.2.2 Kopolyester (PETG)

PET neboli polyethylentereftalát byl objeven firmou DuPoint okolo roku 1930 a řadí se do skupiny termoplastů. Roku 1941 podali první patent pánové R. Whinfield a J. T. Dickson z firmy Calico Printer's, která se zabývá textilem, v britském Manchesteru. Z PET se pod názvem Mylar začala v 50. letech vyrábět potravinářská fólie. PET lahev byla patentována až roku 1973. Začátkem 80. let se PET dočkal komerčního využití. Dnes je PET v oblasti výroby obalů jedním z nejpoužívanějších plastů na světě. Jsou z něj vyráběny například lahve, nádoby, jednorázové obaly i textilní látka. Z důvodu větší křehkosti, a ne příliš optimální tisknutelnosti bylo zapotřebí tento materiál nějakým způsobem modifikovat. To se podařilo přidáním modifikovaného glykolu ve fázi polymerace. Tím vzniknul materiál PETG. Disponuje nepravidelnou molekulární strukturou. Vláknem tohoto termoplastu kombinuje jak dobrou tisknutelnost PLA, tak mechanické vlastnosti ABS (houževnatost, odolnost proti nižším a vyšším teplotám). Touto kombinací je docíleno toho, že se z PETG dají tisknout plně funkční mechanické díly a sestavy (Pruša, 2019; Tractus, 2019).

Při tisku PETG vyžaduje přesnost na teplotu, která by se měla ideálně pohybovat okolo 250 °C ± 10 °C. Začíná měknout okolo 220 °C. Dále je náchylné na stringování, tzn. za extruderem zůstává roztavený materiál v podobě slabých vlásků, viz. tabulka č. 1.2. Po dokončení tisku je tedy nutné tyto vlásky odstranit. Tento problém se dá do jisté míry odstranit změnou nastavení tiskárny. Adheze mezi vrstvami tisku je velmi dobrá a zároveň není velká ani tepelná roztažnost materiálu. Proto během, ani po tisku nedochází k různému kroucení, nebo odlepování modelu od podložky. Oproti ostatním materiálům má PETG tu výhodu, že je odolnější vůči kyselinám a rozpouštědlům. Je tedy velmi těžké

ho naleptat. Je označován jako bezpečný pro potravinářské účely. Lze ho i vyleštit, a to jak mechanicky, tak například i plamenem. Je vhodný pro tisk vodotěsných modelů, jeho absorpce vlhkosti je velmi dobrá. Josef Průša v technickém listu materiálu PETG uvádí, že po 4 týdnech absorbuje pouze 0,3% vody (Pruša, 2019). Při vystavení UV záření model z tohoto materiálu poměrně rychle měkne (FilamentPM, 2017; Kloski a Kloski, 2017).

Tabulka 1.2: Základní vlastnosti materiálu PETG

Výhody	Nevýhody
Vysoká teplotní odolnost	Nevhodné pro drobné díly
Snadný tisk	Možnost stringování
Malá smrštivost a kroucení	Horší kvalita přemostění
Síla a odolnost	
Jednoduché broušení	

1.2.3 Akrylonitril butadien styren (ABS)

Okolo roku 1947 byl firmou U. S. Rubber představen nový terpolymer složený z akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Jednalo se o směs kaučukovitého kopolymeru butadienu s akrylonitrilem a tuhého kopolymeru styrenu s akrylonitrilem. Firma termoplast využívala na válcování desek a vytlačování trubek. S rozvojem zpracovatelských technologií v padesátých letech (vstřikování, tvarování, vytlačování atd.) se pokročilo s vývojem materiálu a došlo ke zlepšení jeho vlastností. Především díky technologii roubování. V šedesátých letech bylo již ABS běžně využíváno, ovšem jeho cena se pohybovala příliš vysoko. Ta omezovala jeho další rozšíření. Dnes už se jeho cena snížila a začal se ve velké míře využívat např. v automobilovém průmyslu. Vyrábí se z něj nárazníky automobilů, různé kryty nebo kostky stavebnice LEGO (Bartuněk, 2008; Prusament, 2019).

Mezi přednosti materiálu ABS patří zejména dobrá odolnost vůči nárazu a otěru, tepelná odolnost okolo 98 °C a také dobrá odolnost vůči UV záření, viz. tabulka č. 1.3. Díky těmto vlastnostem je použitelný v mechanicky namáhaných sestavách, zároveň je vhodným materiálem pro venkovní použití. Teplota zpracování se pohybuje v rozmezí od 210 °C do 260 °C. Mezi další výhody patří i to, že je rozpustitelný v acetonu. To umožňuje spojování dílů bez pomoci lepidel. Stačí pouze díly lehce potřít acetonem a spojit. Také se acetonu využívá při post-procesingu k vyhlazování a leštění (Bartuněk, 2008).

Naopak velká nevýhoda ABS je vysoká tepelná roztažnost, ta způsobuje kroucení modelu během tisku a odlepování od podložky. V určité míře se tomu dá zabránit uzavřením tiskárny do boxu. Zde se vytvoří konstantní teplota a zabrání se tak rychlému chladnutí modelu při procesu tisku. Box také může vyřešit jeho další nevýhodu, a tou je nepříjemný zápach během tisku. Zápach lze omezit například použitím odvětrávání přes uhlíkový filtr. Stejně jako ostatní zmíněné materiály je možné ho dnes sehnat v nepřeberných barevných variantách. V poslední době se objevily i vylepšené materiály ABS, jako např. ABS+ nebo ABS-T (MaterialPro3D, 2019).

Tabulka 1.3: Základní vlastnosti materiálu ABS

Výhody	Nevýhody
Vysoká odolnost proti nárazům a teple	Nepříjemný zápach
Pevný a univerzální	Horší v drobných detailech
Možnost vyhlazení acetonovými parami	Vyžaduje vyšší teplotu v místnosti
Odolnost vůči UV záření	Vysoká tepelná roztažnost

1.2.4 Akrylonitril styren akrylát (ASA)

V 70. letech 20. století bylo potřeba vylepšit, nebo vymyslet podobný materiál jako ABS a zlepšit některé z jeho vlastností. To se povedlo firmě BASF, která představila nový materiál na bázi akrylonitrilu, styrenu a akrylátového kaučuku. Jedná se také o termoplast jako ABS a je také vyráběn pomocí roubování. Dostal název Luran S. Tento nový materiál umožnil např. dlouhodobé využití v exteriérech. Tato vlastnost u ABS byla poměrně omezena. Oproti ABS se dále vyznačuje vyšší odolností vůči povětrnostním vlivům a UV záření. Jeho předností je také dobrá rozměrová stabilita a kvalita tisku při náročných detailech. Vysoká kvalita zůstává i při tisku malých modelů. Zároveň je odolný proti žloutnutí. Podobně jako ABS se ve velké míře uplatňuje v automobilovém průmyslu. Vyznačuje se vysokým leskem a dobrou chemickou odolností (Bartuněk, 2008; MaterialPro3D, 2019).

Mezi jeho hlavní nevýhodu materiálu ASA patří cena, ta je poměrně vysoká. Dále vyžaduje vysokou teplotu extrudéru, která se pohybuje mezi 240 °C až 255 °C. Při rychlém zchlazení může finální model prasknout. Při tisku se stejně jako u ABS uvolňují zdraví škodlivé výpary, viz. tabulka č. 1.4. ASA lze využívat až do minimální teploty -20 °C. Teplotně namáhat vyššími teplotami ji lze pouze krátkodobě do teplot mezi 71 °C až 93 °C (Redwood et al., 2017).

Tabulka 1.4: Základní vlastnosti materiálu ASA

Výhody	Nevýhody
Vhodné pro venkovní použití – UV stabilní	Velké modely se mohou kroutit
Vysoká teplotní odolnost	Zápach během tisku (ale menší než u ABS)
Detailní tisk bez stringování	Obsahuje styren
Možnost vyhlazení acetonovými parami	Hygroskopický
Jednoduchý post-processing	Velmi silná přilnavost k zrnitému plátu
Vysoká odolnost proti nárazům a opotřebení	
Recyklovatelné	

1.3 Parametry FFF tisku

Parametry tisku jsou nastavovány s ohledem na konkrétní tisknutý model, vybavení a zvolený materiál. U každého materiálu udává výrobce rozsah teplot tisku a v některých případech i rychlost tisku. Konečné nastavení závisí na konkrétních podmínkách, v kterých je tisknuto. Existuje velké množství testovacích objektů. Asi nejznámější je model lodě, pod názvem „3DBenchy“. Ten prověří tisk negativně skloněných stěn a mostků. Lze na něm vyzkoušet rychlost i teplotu tisku. Velmi často se využívají i testovací objekty jako teplotní věž na zjištění ideální teploty nebo tisk můstků (Prusa, 2016).

1.3.1 Teplota trysky

Výrobce udává ke konkrétnímu filamentu optimální teplotní rozsah pro tisk. Při změně teploty se budou měnit jak vizuální vlastnosti, tak především ty pevnostní. Během tisku se teplota trysky nejčastěji pohybuje rozmezí 200 °C až 240 °C (Horne a Hausman, 2017).

1.3.2 Teplota podložky

Nastavení teploty platformy se využívá především u materiálů, které mají při chladnutí tendenci se smršťovat, a tím vytvářet vnitřní pnutí. Může tak docházet k nedokonalému tisku. Teplota platformy se od výrobce také udává v daném teplotním rozsahu. Při nastavení příliš vysoké teploty se model může začít roztékat. Vyhřívání platformy vyžadují především materiály ABS a ASA (Císař, 2019).

1.3.3 Výška vrstvy (Layer height)

Výška vrstvy přímo úměrně ovlivňuje dobu tisku. Při vysoké výšce vrstvy jsou více patrné jednotlivé vrstvy tisku. Vysoké vrstvy se využívá při tisku velkých modelů, u kterých není vyžadována velká přesnost na detail. U těchto modelů lze tisk ještě více urychlit použitím například trysky o průměru 0,8 mm. Ta umožní tisknout ještě vyšší vrstvou. Naopak při malé trysce a velmi nízké vrstvě lze docílit i opravdu jemných detailů. Tisk ovšem trvá mnohonásobně delší dobu. Nejpoužívanější výška vrstvy je okolo 0,15 mm. Určitého kompromisu lze dosáhnout při kombinaci výšek vrstev. Tam, kde vyžadujeme detailnější tisk, použijeme vrstvy slabší než na zbytku modelu. To ovšem neumí všechny tiskárny (Jones et al., 2011).

1.3.4 Perimetry

Nastavení počtu perimetrů určuje, kolik tiskových vláken bude tvořit vnější plášť modelu. Čím vyšší počet perimetrů je použit, tím bude plášť silnější. Vyšší počet perimetrů prodlužuje výslednou dobu tisku. Využívá se při tisku složitějších geometrií, například šikmých stěn. V případě příliš nízkého počtu perimetrů, může dojít ke snadnému zhroucení takovéto geometrie (Prusa, 2016).

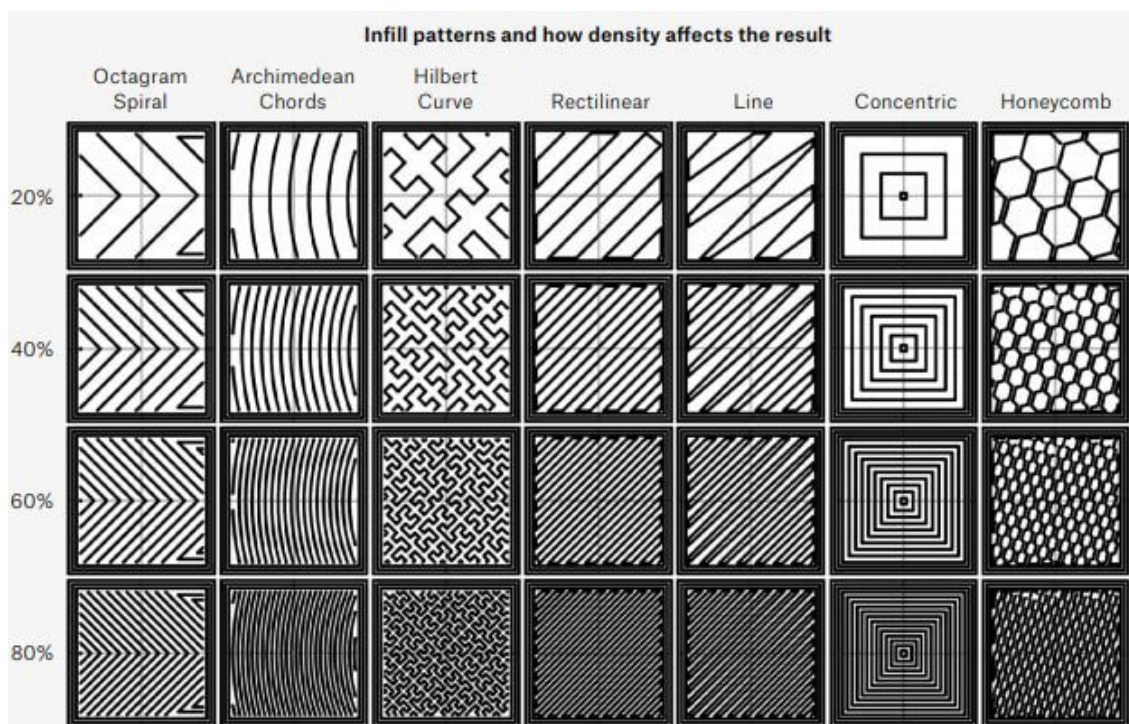
1.3.5 Podpěry (Supports)

Nevýhodou většiny technologií 3D tisku je, že model se převislou geometrií nelze tisknout bez podpor. Podpůrné struktury si lze představit jako takové lešení. Slouží jako opěrná plocha pro tisk převislých částí modelu. Bez nich by nebylo možné je vytisknout. Problémové tvary lze vystihnout na písmenech Y,H,T.

Příručka Josefa Průši uvádí, že převisy v úhlu $\pm 30^\circ$ by měly být tisknutelné bez problémů. U převisů okolo 45° je velice pravděpodobné, že se tisk bez podpor zhroutí. Je proto nutné je tisknout s pomocí podpor. Některé technologie (např. SLS) využívají jako podporu materiál, do kterého se tiskne, ale u technologii FFF a jí podobné to nelze. Proto je nutné k modelu vygenerovat tzv. podpůrné struktury (Jones et al., 2011; Prusa, 2016).

1.3.6 Výplň (Infill) a její struktura

Výplň se udává v procentech z celkového prostoru. Nastavením výplně lze ušetřit velké množství materiálu i času, především při tisku dutých objektů. Hustotu výplně lze nastavit od 0 % do 100 %. Hodnota 40 % výplně stačí na to, aby model měl dostatečnou mechanickou pevnost. Minimum potřebné pro podporu plochých stropů je 20 %. Na obrázku 1.2 (b3d online, 2019) jsou znázorněny různé struktury výplně (Císař, 2019).



Obrázek 1.2: Vzhled a hustota výplně

2 Tahová zkouška

Tahová zkouška patří mezi jednu z nejstarších laboratorních zkoušek. Již v 15. století ji prováděl Leonardo da Vinci při zkoušce pevnosti konopných lan. Stavební a konstrukční materiály se začaly ve velkém testovat až v druhé polovině 19. století. Tato zkouška je velice jednoduchá, zároveň díky přímým výsledkům je velmi důležitá a velmi rozšířená (Forejt a Píška, 2006).

Tahová zkouška je prováděna podle normy ČSN EN 10 002-1 – Zkouška tahem za okolní teploty. Zkouška je prováděna pomocí pomalu navyšujícího se tahového zatížení na upnutém zkušebním vzorku až do té doby, než nastane bod lomu. Okolní teplota se během zkoušky musí pohybovat mezi 10 °C až 35 °C. Pokud je požadavek na zkoušku v jiné konkrétní teplotě, může být teplota zvýšena nebo snížena (Hosford, 2005).

Zkušební vzorek (nejčastěji tyč) se před zkouškou upevní na obou koncích do univerzálního trhacího zařízení a začne se zvolna napínat. Vzorek se většinou napíná až do té doby, než se přetrhne. Stroj během tohoto procesu pořizuje grafický záznam všech hodnot, které byly před zkouškou zadány. Nejčastěji se jedná o závislost prodloužení na působící síle. Z výsledného grafu je posléze možné vypočítat další veličiny, které charakterizují elastické a plastické vlastnosti materiálu. Mezi ně se řadí mez pevnosti v tahu, tažnost, kontrakce a mez kluzu. Pro technické výpočty se působící mechanická síla F převádí na mechanické napětí σ . K tomuto převodu musíme znát počáteční plochu průřezu zkoušeného vzorku S_0 :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2.1)$$

Zkušební tyč se tahem deformuje a dochází k jejímu prodloužení. Význačnou charakteristikou je relativní prodloužení ϵ , které je vztahem mezi aktuální délkou vzorku l a počáteční délkou vzorku l_0 :

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

Dle Hookova zákona při působení malých sil dochází k malým, elastickým deformacím a výsledná pružná deformace materiálu σ je lineární. Youngův model pružnosti tento vztah zachycuje za pomoci konstanty E :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.3)$$

Vzorec 2.3 zachycuje okamžitou nedestruktivní elastickou deformaci. Při aplikaci větších sil již není vztah mezi napětím a deformací lineární a dochází k deformaci trvalé neboli plastické. Při těchto silách je deformace složena z plastické a elastické složky (Davis, 2004; Forejt a Píška, 2006; Shingley et al., 2010).

2.1 Mez kluzu

Mezí kluzu se nazývá okamžik, kdy se projevuje začátek plastické deformace. V technické praxi je tento okamžik velmi důležitý. Například různé konstrukce nebo zařízení nemohou být vystaveny vyššímu mechanickému napětí, než je právě mez kluzu. Pokud mu ale vystaveny jsou, může po určitém čase dojít ke ztrátě funkčnosti nebo i porušení lomem. Po překročení meze kluzu se zvětšuje relativní prodloužení, aniž by se zvětšovalo normálové napětí (materiál se prodlužuje bez zvětšování zatěžující síly – tečení materiálu), mění se fyzikální vlastnosti materiálu. Vyhodnocuje se napětí, které odpovídá lokálnímu maximu na křivce (horní mez kluzu) a následné lokálnímu minimu (dolní mez kluzu). U většiny slitin s polykrystalickým charakterem je tahová křivka bez anomálií a má obecný charakter. U těchto křivek není většinou moc dobře rozpoznatelná počáteční lineární závislost mezi napětím a deformací. Z toho vyplývá, že nalézt okamžik, který by odpovídal mezi kluzu, není jednoznačné. V takovýchto případech je možné určit takzvanou smluvní mez kluzu, která v určité úrovni připouští plastickou deformaci. Za smluvní mez kluzu se bere hodnota, která způsobí prodloužení 0,2 % z celkového poměrného prodloužení, označována je $F_{p0,2}$. Elastickou deformaci je nutné odečíst, jelikož je tato mez vyhodnocována jenom z trvalé deformace. Nejčastěji se to praktikuje pomocí grafického způsobu. V místě, které odpovídá smluvní hodnotě trvalé deformace, se na ose prodloužení nebo deformace uvede rovnoběžka s čarou označující elastické chování. V místě, ve kterém se čára protne s naměřenou křivkou, se odečte síla. Tato síla se využije k výpočtu meze kluzu. Hodnota meze kluzu je udávána celými čísly v MPa (Hosford, 2005; Ing. Müller a Mgr. Petržela, 2011; Pecina a Pecina, 2006).

2.2 Mez pevnosti

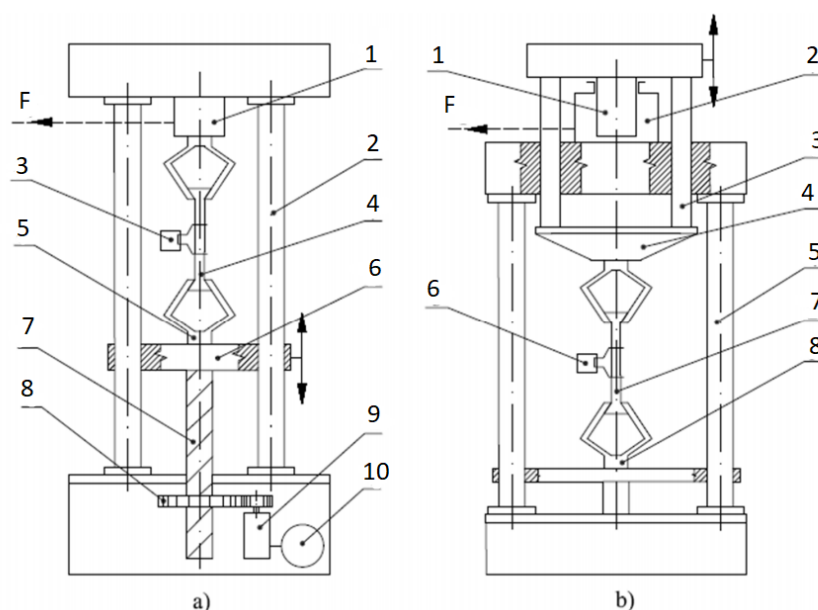
Mez pevnosti lze vypočítat, pomocí maximální síly F_{max} , při které není porušena celistvost materiálu. Jejím podílem s počátečním průřezem vzorku S_0 dostaneme mez pevnosti R_m :

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (2.4)$$

(Machek, 2014)

2.3 Zkušební trhací stroj

Zkušební trhací stroj patří mezi základní vybavení každé laboratoře zabývající se mechanickými zkouškami. Provádí se na nich zkouška tahem. Na těchto strojích lze zároveň provádět zkoušky jak na tlak, tak i na ohyb. Mohou zatěžovat zkoušený vzorek jak staticky, tak dynamicky. Jestliže je během pokusů vyžadováno větší zatížení než 200 kN, je nutné použít stroj s hydraulickým pohonem. Na takto poháněných strojích je síla snímána z pracovního válce podle tlaku oleje. Na strojích s mechanickým pohonem je měření prováděno pomocí dynamometru. Stroje jsou rozděleny do kategorií podle velikosti a síly, kterou jsou schopny vyvinout. Rozdíl mezi mechanicky a hydraulicky poháněným strojem je znázorněn na obrázku 2.1 (Čech, 2020) (Shingley et al., 2010).



Obrázek 2.1: *Universální zkušební stroj*

a) *mechanický*: 1 – dynamometr, 2 – rám stroje, 3 – průtahoměr, 4 – zkušební tyč, 5 – upínací hlava, 6 – pohyblivý příčník, 7 – vřeteno, 8 – ozubené soukolí, 9 – převodová skříň, 10 – elektromotor; b) *hydraulický*: 1 – hydraulický píst, 2 – hydraulický válec, 3 – vodící lišta, 4 – pohyblivý příčník, 5 – rám stroje, 6 – průtahoměr, 7 – zkušební tyč, 8 – upínací hlava

Do trhačického stroje se umísťují zkušební vzorky pomocí vhodných prostředků. Nejčastějšími vzorky jsou tyče. K zajištění mohou být použity například osazené čelisti, klíny nebo závitové čelisti.

Zkušební rychlost se dá definovat jako rychlost posuvu pohyblivého příčníku a modulu materiálové pružnosti (Pecina a Pecina, 2006).

2.4 Vyhodnocení tahové zkoušky

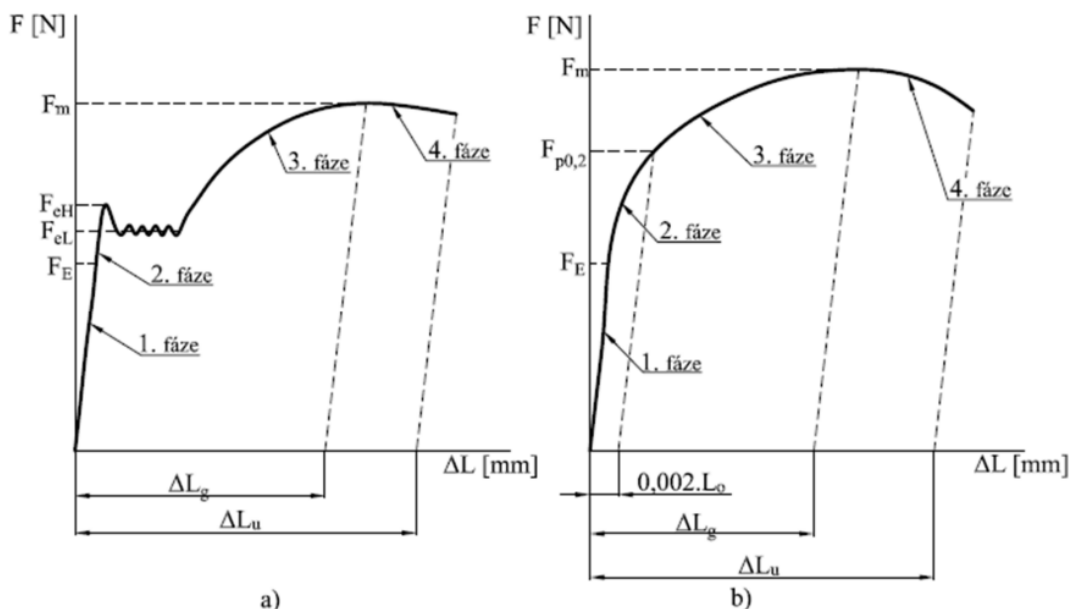
Zkušební tyč je pomocí zátěžové síly F strojem deformována – prodlouží se. Díky této deformaci je změněna délka l_0 , která byla naměřena na začátku pokusu, o prodloužení Δl na momentální délku.

$$l = l_0 + \Delta l \quad (2.5)$$

V ten samý okamžik se zmenšuje plocha S_0 na okamžitý průřez S , platí zde ovšem zákon o zachování objemu. Pracovní diagram graficky znázorňuje velikost zátěžové síly F v závislosti na prodloužení l . Pomocí registračního zařízení je stroj schopen zaznamenávat hodnoty F a l více než tisíckrát za sekundu. Díky těmto velice přesným hodnotám je možné vytvořit i velmi přesný pracovní diagram. Hodnoty F a l jsou zaznamenávány z pohybu příčníku. Ty ale mohou být zaznamenávány i pomocí průtahoměru, který zaznamenává rovnou i prodloužení Δl k zátěžové síle F (Machek, 2014; Pecina a Pecina, 2006).

2.5 Pracovní diagram

Pracovní diagramy na obrázku 2.2 (Machek, 2014) ukazují rozdílné meze kluzu:



Obrázek 2.2: Pracovní diagram a) s výraznou mezí kluzu b) s nevýraznou mezí kluzu

Pomocí tohoto diagramu lze celý proces tahové zkoušky rozdělit na 4 fáze:

1. Oblast pružných deformací

Oblast pružných deformací je na diagramu označena jako 1. fáze. V této fázi se zkušební tyč přímo úměrně prodlužuje se zvyšující se zatěžující silou. Proto je na grafickém výstupu přímka. Během této fáze se tyč napíná pouze elasticky, tzn. že tyč se po uvolnění vrátí do své původní délky. Silou F_e je tato část ukončena. Tato síla označuje mez elasticity. Většinou se ale nezjišťuje, jedná se o přechod mezi pružnou a trvalou deformací (Shingley et al., 2010).

2. Oblast od meze úměrnosti do meze kluzu

Jako 2. fáze je označována oblast od meze úměrnosti do meze kluzu. Během ní je vidět poměrně důležitý rozdíl mezi uklidněnými a neuklidněnými materiály. Zde se zkušební tyč přestává elasticky deformovat a dále diagram pokračuje dvěma způsoby:

- Tyč se přestává lineárně deformovat a vzniká prodleva. Záznam zde pokračuje, aniž by silové zatížení rostlo. Podle vlastností materiálu může být zalomení křivky různě výrazné. Síla, během které nastává zlom nebo prodleva ukončuje 2. fázi. Ta se označuje jako horní mez kluzu F_{eH} a je vidět na obrázku 2.1a.
- Zkušební tyč se zde přestává deformovat lineárně a pokračuje plynule do rovnoměrné deformace. Žádné velké zlomy zde nejsou patrné. Tato deformace je k vidění na obrázku 2.1b.

Smluvní silou na mezi kluzu, která je označována $F_{p0,2}$, je ukončena 2. fáze. Povolena deformace původní naměřené délky tyče je 0,2 %. Z této hodnoty se poté určuje smluvní síla na mezi kluzu (Forejt a Píška, 2006; Shingley et al., 2010).

3. Oblast rovnoměrných trvalých deformací

Třetí fáze je označována jako oblast rovnoměrných trvalých deformací, zde zatížení nad mezí kluzu dále rovnoměrně roste. Tyč se trvale deformuje až do jejího zaškrcení. Když nastane tento okamžik, je 3. fáze u konce. Ta je určena maximální silou dosaženou během zkoušky. Tato síla je označena F_m a vzniká během ní prodloužení označené jako Δl_g (Pecina a Pecina, 2006).

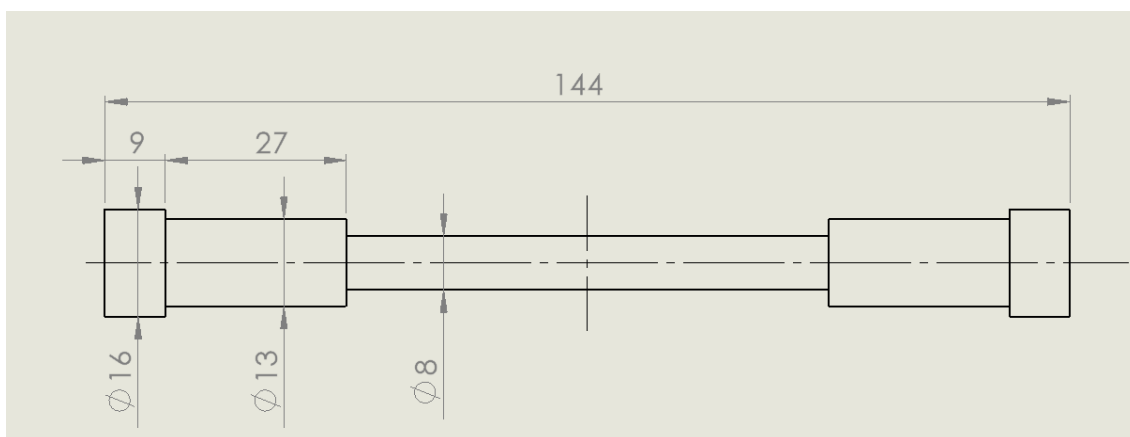
4. Oblast nerovnoměrných trvalých deformací

Čtvrtá fáze začíná po dosažení meze pevnosti. Po překročení této meze nastává samovolné nezastavitelné prodlužování až do bodu lomu. Krček se dále prodlužuje, i když síla klesá. Díky malému průřezu krčku zde napětí neustále prudce roste. Podle druhu testovaných materiálů vznikají různé druhy krčků (Machek, 2014).

3 Metodika

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním pevnostních charakteristik filamentů ovlivněných prostředím. Jedná se konkrétně o filamenty z materiálů PLA, PETG, ABS a ASA.

V programu Solid Works bude vymodelována, podle rozměrů na obrázku č. 3.1, zkušební tyč. Dokončený model musí být uložen ve formátu STL, aby ho mohla 3D tiskárna nahrát a vytisknout.



Obrázek 3.1: Model zkušební tyče

K tisku zkušebních tyčí bude použita 3D tiskárna od firmy Průša Research, konkrétně model Original Prusa i3 MK3S+ a bude osazena tryskou o průměru 0,4 mm také od stejného výrobce. Tiskárna disponuje programem PrůšaSlicer, který slouží k exportu tiskových souborů do 3D tiskárny. Do programu bude nahrán soubor se zkušební tyčí ve formátu STL. Zároveň lze v programu upravovat model a zadávat parametry tisku.

V závislosti na výsledcích pokusů o nejvyšší pevnost v autorově bakalářské práci (Čech, 2020) budou nastaveny parametry tisku následovně: poloha tisku bude vodorovná, výška vrstvy 0,25 mm a hustota výplně 100 %. Tato kombinace dosahovala nejlepších pevnostních výsledků, proto bude brána jako výchozí pro experimenty prováděné v této práci. Teploty tisku a platformy jsou shrnuty v tabulce č. 3.1. Uvedené teploty jsou doporučené výrobcem filamentů, ale je možné, že se během pokusu budou mírně upravovat v závislosti na kvalitě a průběhu tisku. Podpory a trasy si program PrůšaSlicer nastaví sám.

Před samotným tiskem je potřeba provést kalibraci tiskárny, zkontrolovat čistotu trysky a správné zavedení filamentu do extruderu.

Z každého materiálu bude vytisknuto 44 modelů, tzn. 176 modelů celkem. Modely mohou být tisknuty po více kusech naráz, ideálně po třech. Při více kusech by mohlo docházet k příliš velkému chladnutí vrstev, to by mohlo způsobit jejich nedokonalé spojení a následné ovlivnění výsledků. Doba tisku jednoho modelu bude trvat zhruba 1,5 hodiny.

Tabulka 3.1: Teploty tisku a platformy

Materiál	Teplota tisku	Teplota platformy
ABS	255 °C	100 °C
ASA	260 °C	110 °C
PETG	240 °C	90 °C
PLA	215 °C	55 °C

Po dokončení tisku budou modely 5–10 minut ponechány na platformě vychladnout, až poté mohou být vyjmuty. Zamezí se tím jejich případné deformaci. Po vyjmutí bude každý model ručně zbaven podpor, vizuálně zkontrolován a kvůli skrytým vadám tisku i zvážen. K vážení bude použita certifikovaná váha Kern 770, která je zobrazena na obrázku 3.2. Navážené hodnoty budou zaznamenány a model se označí identifikačním štítkem. Na štítku bude uvedeno sériové číslo, materiál a datum dokončení tisku a kontroly. Takto se bude pokračovat, dokud nebude vytisknuto všech 176 modelů.



Obrázek 3.2: Váha Kern 770

Modely budou rozděleny do čtyř skupin. V každé skupině budou zastoupeny všechny čtyři materiály, a to 11 kusy od každého, tzn. 44 kusů celkem. Tyto skupiny budou dopsány na identifikační štítek. Testováno bude vždy jen 10 kusů, ten 11. je pouze rezervní, kdyby došlo během pokusu k poškození některého z modelů. Každá skupina bude vystavena jinému prostředí. Skupina Heat bude vystavena zvýšené teplotě, skupina Frost snížené teplotě, skupina UV bude vystavena UV záření a skupina Normal bude uskladněna v su-

chu a temnu při pokojové teplotě. Skupina Normal bude využita jako výchozí, všechny dosažené výsledky s ní budou porovnávány.

1. Skupina Normal

Modely v této skupině nebudou vystaveny žádnému specifickému prostředí. Po vytisknutí, kontrole a označení budou vloženy do světlu nepropustné krabice. Tato krabice bude poté umístěna na suché místo s konstantní pokojovou teplotou. Ideálně okolo 21 °C.

2. Skupina Frost

V této skupině budou modely umístěny do krabice, do které se umístí také měřicí sonda dataloggeru. K tomuto i k následujícímu pokusu bude použit teplotní data logger značky Lascar, konkrétně bude použit model EL-USB-TC-LCD s teplotní sondou Greisinger GTF 300, ke kterému je nutné nainstalovat program EasyLog USB. V tomto programu bude datalogger spuštěn a bude také nastaven interval měření na každých 30 sekund. V programu bude na konci měření vytvořen graf. Krabice s modely a se sondou bude vložena do mrazáku. Zde budou modely umístěny po dobu 6 hodin. Za tuto dobu by se měla teplota modelů dostat na teplotu – 20 °C. Po uplynutí 6 hodin bude pokus ukončen, v programu EasyLog USB bude na dataloggeru ukončeno měření. Výsledný graf se uloží a modely budou uskladněny v temnu a v pokojové teplotě.

3. Skupina Heat

Tato skupina bude ovlivněna zvýšenou teplotou. Modely se rozprostřou na plechovou podložku a budou vloženy do horkovzdušné elektrické trouby. K tomuto pokusu bude opět použit datalogger Lascar, se stejným nastavením jako v předešlém pokusu. Na troubě bude nastaveno 60 °C, poté bude podle reálné teploty v troubě upravováno její nastavení teploty, dokud se nedosáhne reálných 60 °C. Tento pokus bude probíhat také po dobu 6 hodin, stejně jako předchozí pokus. Po uplynutí stanovené doby bude pokus ukončen. Modely se vyndají z trouby a nechají se zchladnout při pokojové teplotě. Případné mírně zdeformované modely budou před zchladnutím opatrně ručně narovnány, předejde se tím problémům při upevňování do trhacího stroje. Po skončení pokusu bude také ukončeno měření na data loggeru, ten vygeneruje graf, který se uloží.

4. Skupina UV

Při pokusu v této skupině budou modely vystaveny UV záření. Modely budou rozprostřeny do skleněného akvária. Na toto akvárium bude umístěna lampa s UV zářivkou, konkrétně se bude jednat o zářivku Philips TL – D 15 W / 08. Toto akvárium bude umístěno na temné místo s pokojovou teplotou. Vzhledem k tomu že ovlivnění UV zářením není tak výrazné jako ovlivnění teplotou (Shingley et al., 2010), bude tento pokus probíhat 12 hodin. Každé 3 hodiny budou všechny modely pootočený o 90 °, z důvodu ovlivnění celého obvodu modelu UV zářením. Po dokončení pokusu budou modely uskladněny do krabice při pokojové teplotě.

Po provedení těchto pokusů s prostředím bude provedena tahová zkouška, pro kterou bude použit univerzální mechanický trhací stroj modelové řady AG-X Plus o maximální trhací

síle 50 kN od značky Shimadzu Corporation, ten je zobrazen na obrázku 3.3. Tento stroj podporuje software TRAPEZIUM X. V programu bude nastavena zkušební metoda. Zde bude zvolen počet 10 testovaných vzorků. Nastavena bude zkouška tahem a testovaný tvar, tyč o průměru 8 mm. Rychlost zdvihu bude nastavena na $0,75 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Dále budou nastaveny sledované parametry. Pro tento pokus to bude maximální síla [N], maximální napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], maximální zdvih [mm] a maximální prodloužení [%]. Následně bude tato metoda uložena.

V programu TRAPEZIUM X bude spuštěna námi uložená metoda a na výstupním listu bude změněn titulek, podle toho, jaký materiál a z jaké skupiny bude zrovna testován. Model bude do trhacího stroje upnut pomocí přidržovacích pouzder, aretačních čepů a upínacího modulu. Během upínání modelů bude stroj přepnut do manuálního režimu, aby bylo možné pohybovat příčnícem. Po upnutí se příčník nastaví do takové polohy, aby měl upnutý model mírnou vůli. Model nesmí být příliš napnutý, ovlivnilo by to měření. Hrozilo by také přetržení modelu ještě před samotným testem. Po nastavení příčníku bude trhací stroj přepnut zpět do automatického režimu. Před spuštěním testu bude spuštěna kalibrace síly, po této kalibraci bude nastavena hodnota zdvihu na nulu. Proces kalibrace bude proveden před začátkem každé série testu.

Po upnutí modelu, nastavení příčníku a kalibraci bude spuštěn test. Během testu bude možné na monitoru sledovat aktuální graf a vývoj testu. Po přetržení modelu bude příčník opět přepnut do manuálního režimu a model bude vyměněn za další. Tento proces se bude opakovat, než bude otestována celá skupina modelů. Po skončení testu skupiny bude uložen výstupní protokol testu ve formátu PDF. Protokol bude později porovnán s dalšími protokoly jiných skupin. Během testů je nutné dodržovat bezpečnou vzdálenost od trhacího stroje. Důležité je také použití ochranných brýlí.



Obrázek 3.3: Univerzální trhací stroj Shimadzu AG-X Plus 50 kN

4 Výsledky

4.1 Výstupní kontrola

Během vizuální výstupní kontroly nebyly patrné žádné výrazné vady tisku. Zjištěny byly pouze malé nedokonalosti u materiálu PETG. Tyto nedokonalosti byly minimální, proto byly vyhodnoceny tak, že jsou v normě a výsledky pokusů neovlivní.

Další částí výstupní kontroly bylo zvážení modelů za účelem zjištění skrytých vad tisku pomocí certifikované váhy Kern 770. Navážené hodnoty z této kontroly jsou zapísány v tabulkách 4.1–4.4. Během této kontroly nebyly zjištěny žádné abnormální rozdíly v hmotnosti modelů. Jsou zde patrné pouze minimální rozdíly, které byly způsobeny odstraňováním podpor tisku. U některých modelů byly malé části těchto podpor ponechány z důvodu jejich složitého odstranění. Při odstraňování těchto malých pevných částí hrozilo poškození modelu. Proto bylo rozhodnuto, že budou ponechány, protože následné výsledky tahové zkoušky nijak neovlivní.

Všechny testované modely prošly procesem výstupní kontroly a byly vyhodnoceny jako způsobilé k provedení dalších pokusů.

Tabulka 4.1: *Normal – Hmotnosti [g] modelů z výstupní kontroly*

#	ABS	ASA	PETG	PLA
1.	14,47	14,88	17,62	17,43
2.	14,51	14,84	17,68	17,44
3.	14,41	14,87	17,67	17,43
4.	14,44	14,88	17,67	17,41
5.	14,49	14,83	17,59	17,42
6.	14,39	14,81	17,67	17,42
7.	14,46	14,83	17,69	17,40
8.	14,47	14,84	17,73	17,42
9.	14,42	14,86	17,69	17,42
10.	14,38	14,87	17,71	17,43
Průměr	14,44	14,85	17,67	17,42

Tabulka 4.2: *Frost – Hmotnosti [g] modelů z výstupní kontroly*

#	ABS	ASA	PETG	PLA
1.	14,41	14,83	17,72	17,06
2.	14,45	14,87	17,71	17,03
3.	14,43	14,82	17,72	17,06
4.	14,45	14,84	17,75	16,96
5.	14,36	14,92	17,63	17,32
6.	14,45	14,81	17,67	17,40
7.	14,43	14,82	17,67	17,42
8.	14,43	14,88	17,75	17,42
9.	14,45	14,90	17,70	17,42
10.	14,41	14,91	17,70	17,43
Průměr	14,43	14,86	17,70	17,25

Tabulka 4.3: *Heat – Hmotnosti [g] modelů z výstupní kontroly*

#	ABS	ASA	PETG	PLA
1.	14,44	14,92	17,70	16,98
2.	14,46	14,90	17,66	16,96
3.	14,44	14,85	17,72	16,65
4.	14,41	14,90	17,72	17,03
5.	14,43	14,90	17,61	16,96
6.	14,43	14,80	17,69	17,01
7.	14,50	14,85	17,71	16,75
8.	14,49	14,83	17,65	16,99
9.	14,50	14,87	17,76	17,01
10.	14,38	14,88	17,70	17,02
Průměr	14,49	14,87	17,69	16,93

Tabulka 4.4: UV – Hmotnosti [g] modelů z výstupní kontroly

#	ABS	ASA	PETG	PLA
1.	14,46	14,85	17,78	16,92
2.	14,40	14,90	17,77	16,90
3.	14,39	14,84	17,69	17,01
4.	14,49	14,81	17,69	17,02
5.	14,50	14,89	17,67	16,92
6.	14,45	14,85	17,74	16,92
7.	14,50	14,83	17,66	16,98
8.	14,47	14,77	17,62	17,05
9.	14,50	14,84	17,63	16,92
10.	14,44	14,80	17,62	17,02
Průměr	14,46	14,84	17,69	16,96

4.2 Tahová zkouška

Všechny výsledky z tahových zkoušek byly zpracovány do tabulek. Na těchto tabulkách je možné vidět průměrné, minimální a maximální hodnoty u sledovaných veličin, zároveň je zde zobrazen i rozsah mezi minimální a maximální hodnotou. Sledovány byly tyto hodnoty: maximální síla, maximální napětí, maximální zdvih a maximální prodloužení.

4.2.1 ABS

Výsledky z pokusů s materiálem ABS jsou znázorněny v tabulkách 4.5–4.8. Na nich je patrné, že materiál ABS nejvíce záporně ovlivnil pokus se zvýšenou teplotou. Rozdíl průměrné hodnoty maximální síly mezi skupinou Heat a výchozí skupinou Normal byl -18,16 N. Naopak ke zvýšení maximální síly nejvíce přispěl pokus s UV zářením. Zde byl rozdíl mezi skupinou Normal a UV +12,53 N. Skupina UV tedy dosáhla u tohoto materiálu nejvyšší průměrné maximální síly. Tato síla byla konkrétně 1681,92 N = 171,51 Kg. Ve skupině UV dosáhl model se sériovým číslem 3, nejvyšší maximální sílu o hodnotě 1742,53 N = 177,69 Kg. Celkový rozdíl mezi skupinou s největší a nejmenší maximální průměrnou silou (skupina UV a skupina Heat) činí 31,68 N.

Nejmenší zdvih byl zaznamenán také u skupiny UV, dosahoval zde hodnoty 2,5 mm. Naopak největší zdvih byl u skupiny Normal, zde byla zaznamenána hodnota 2,99 mm.

Tabulka 4.5: ABS – Normal

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	1632,00	1735,54	103,54	1668,40
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	32,47	34,53	2,06	33,19
Max. zdvih [mm]	2,26	4,23	1,98	2,99
Max. prodloužení [%]	3,14	5,88	2,74	4,15

Tabulka 4.6: ABS – Frost

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	1629,64	1726,86	97,22	1669,39
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	32,42	34,35	1,93	33,21
Max. zdvih [mm]	2,12	3,70	1,58	2,58
Max. prodloužení [%]	2,95	5,14	2,19	3,58

Tabulka 4.7: ABS – Heat

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	1586,34	1717,73	131,39	1650,24
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	31,56	34,17	2,61	32,83
Max. zdvih [mm]	1,79	3,63	1,83	2,69
Max. prodloužení [%]	2,49	5,04	2,55	3,74

Tabulka 4.8: ABS – UV

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	1647,35	1742,53	95,18	1681,92
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	32,77	34,66	1,89	33,46
Max. zdvih [mm]	1,94	3,67	1,73	2,50
Max. prodloužení [%]	2,69	5,09	2,40	3,47

4.2.2 ASA

Materiál ASA byl testován jako druhý v pořadí. Výsledky z testů jsou zobrazeny v tabulkách 4.9-4.12. Zde je vidět, že tento materiál, stejně jako materiál ABS, opět nejvíce ovlivnila zvýšená teplota. Rozdíl mezi výchozí skupinou Normal a Heat je zde -47,62 N. Jako u materiálu ABS, tak i zde nejvíce zvýšil průměrnou maximální sílu pokus s UV zářením. U skupiny UV se tato síla zvýšila oproti normálu o 19,18 N na celkovou hodnotu 1843,24 N = 187,6 Kg. Největší max. síly 1861,76 N = 189,85 Kg dosáhl model také ze skupiny UV, se ser. č. 5. U tohoto materiálu byl rozdíl mezi nejsilnější a nejslabší skupinou 66,8 N.

Rovněž jako u materiálu ABS, ale s nepatrně nižšími hodnotami, byly i hodnoty zdvihu. Největší zdvih měla skupina Normal s 2,82 mm a nejmenší skupina UV 2,39 mm.

Tabulka 4.9: ASA – Normal

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	1805,31	1838,98	33,67	1824,06
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	35,92	36,59	0,67	36,29
Max. zdvih [mm]	2,62	3,09	0,48	2,82
Max. prodloužení [%]	3,63	4,29	0,66	3,92

Tabulka 4.10: ASA – Frost

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	1789,45	1834,03	44,58	1815,64
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	35,60	36,49	0,87	36,12
Max. zdvih [mm]	2,31	2,82	0,50	2,58
Max. prodloužení [%]	3,22	3,92	0,70	3,58

Tabulka 4.11: ASA – Heat

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	1762,00	1792,23	30,24	1776,44
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	35,05	35,66	0,60	35,34
Max. zdvih [mm]	2,31	2,84	0,53	2,60
Max. prodloužení [%]	3,21	3,94	0,73	3,61

Tabulka 4.12: ASA – UV

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	1819,35	1861,76	42,41	1843,24
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	36,20	37,04	0,84	36,67
Max. zdvih [mm]	1,83	2,93	1,10	2,39
Max. prodloužení [%]	2,54	4,06	1,53	3,32

4.2.3 PETG

Tento materiál byl testován jako třetí v pořadí a bylo u něj dosaženo poměrně zajímavých výsledků. PETG bylo, poněkud nečekaně, nejvíce ovlivněno pokusem s nízkou teplotou. Skupina Frost dosáhla u tohoto materiálu největší průměrné maximální síly, ta měla hodnotu 2247,8 N = 229,21 Kg. Rozdíl mezi skupinou Normal a Frost činí +26,26 N. Naopak UV záření snížilo průměrnou max. sílu oproti normálu o -19,18 N. Zároveň se ale ve skupině UV objevil jak nejslabší tak i nejsilnější model z tohoto materiálu, přičemž nejsilnější model se ser. č. 1 dosáhl hodnoty 2281 N a model se ser. č. 9 pouze 1797,53 N. Jedná se tak o největší rozdíl v max. síle u jednotlivých modelů ze všech materiálů. Tento rozdíl činí 483,47 N. Skupina Heat zaznamenala pouze malé zlepšení oproti normálu o 8,82 N, zároveň ale měla největší zdvih, který byl průměrně 3,81 mm. Oproti tomu měla nejmenší průměrný zdvih skupina Frost 3,34 mm. Výsledky z testů jsou znázorněny v tabulkách 4.13-4.16.

Tabulka 4.13: PETG – Normal

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	2183,72	2264,71	80,99	2221,54
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	43,44	45,06	1,61	44,20
Max. zdvih [mm]	3,03	3,82	0,79	3,51
Max. prodloužení [%]	4,20	5,30	1,10	4,88

Tabulka 4.14: PETG – Frost

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	2220,81	2268,32	47,51	2247,80
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	44,18	45,13	0,95	44,72
Max. zdvih [mm]	2,98	3,63	0,65	3,34
Max. prodloužení [%]	4,15	5,05	0,90	4,64

Tabulka 4.15: PETG – Heat

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	2181,90	2264,60	82,70	2230,36
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	43,41	45,05	1,65	44,37
Max. zdvih [mm]	3,27	4,07	0,80	3,81
Max. prodloužení [%]	4,54	5,65	1,11	5,30

Tabulka 4.16: PETG – UV

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	1797,53	2281,00	483,46	2202,36
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	35,76	45,38	9,62	43,82
Max. zdvih [mm]	2,50	3,83	1,33	3,49
Max. prodloužení [%]	3,48	5,32	1,85	4,85

4.2.4 PLA

Od materiálu PLA byly, podle předešlých zkušeností, očekávány nejlepší pevnostní výsledky. Ty byly pomocí pokusů potvrzeny. Jejich výsledky jsou zobrazeny v tabulkách 4.17-4.20. PLA nejvíce ovlivnil pokus se sníženou teplotou. Tento pokus snížil průměrnou max. sílu o 155,46 N, což je největší rozdíl mezi všemi materiály. U skupiny Frost byla naměřena průměrná hodnota max. síly $2325,84 \text{ N} = 237,17 \text{ Kg}$. Skupina UV, podle očekávání, modely také ovlivnila negativně. Oproti normálu byla hodnota nižší o 123,9 N. Naopak kladně modely ovlivnil pokus se zvýšenou teplotou. Po tomto pokusu modely dosáhly nejlepších pevnostních vlastností ze všech testovaných materiálů. Průměrně se jejich max. síla, oproti skupině Normal, zvýšila o hodnotu 147,86 N na celkových $2629,16 \text{ N} = 268,1 \text{ Kg}$. Úplně nejlepšího výsledku dosáhl model se ser. č. 2, ten disponoval max. silou o hodnotě $2681,19 \text{ N} = 273,41 \text{ Kg}$. U tohoto materiálu byl zaznamenán i největší rozdíl mezi skupinami u všech zkoušených materiálů. Mezi nejsilnější skupinou Heat a nejslabší skupinou Frost tento rozdíl činil $303,32 \text{ N} = 30,93 \text{ Kg}$.

Mezi všemi testovanými materiály byl u PLA zaznamenán také největší rozdíl v max. zdvihu s hodnotou 1,83 mm. Tento rozdíl byl zjištěn mezi skupinami Heat a UV. Skupina Heat měla zdvih 3,82 mm, tzn. největší ze všech skupin všech materiálů. Naopak skupina UV měla zase nejmenší zdvih ze všech skupin všech materiálů, jeho hodnota činila pouze 1,99 mm.

Tabulka 4.17: PLA – Normal

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	2450,38	2506,46	56,08	2481,30
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	48,75	49,86	1,12	49,36
Max. zdvih [mm]	2,24	2,60	0,36	2,37
Max. prodloužení [%]	3,11	3,61	0,50	3,29

Tabulka 4.18: PLA – Frost

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	2234,81	2381,29	146,48	2325,84
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	44,46	47,37	2,91	46,27
Max. zdvih [mm]	1,68	2,32	0,64	2,07
Max. prodloužení [%]	2,34	3,22	0,88	2,88

Tabulka 4.19: PLA – Heat

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	2565,64	2681,19	115,55	2629,16
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	51,04	53,34	2,30	52,31
Max. zdvih [mm]	2,46	5,07	2,61	3,82
Max. prodloužení [%]	3,42	7,04	3,62	5,31

Tabulka 4.20: PLA – UV

Parametry	Minimum	Maximum	Rozsah	Průměr
Max. síla [N]	2309,66	2399,00	89,34	2357,40
Max. napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]	45,95	47,70	1,78	46,9
Max. zdvih [mm]	1,41	2,44	1,03	1,99
Max. prodloužení [%]	1,95	3,38	1,43	2,77

5 Diskuse

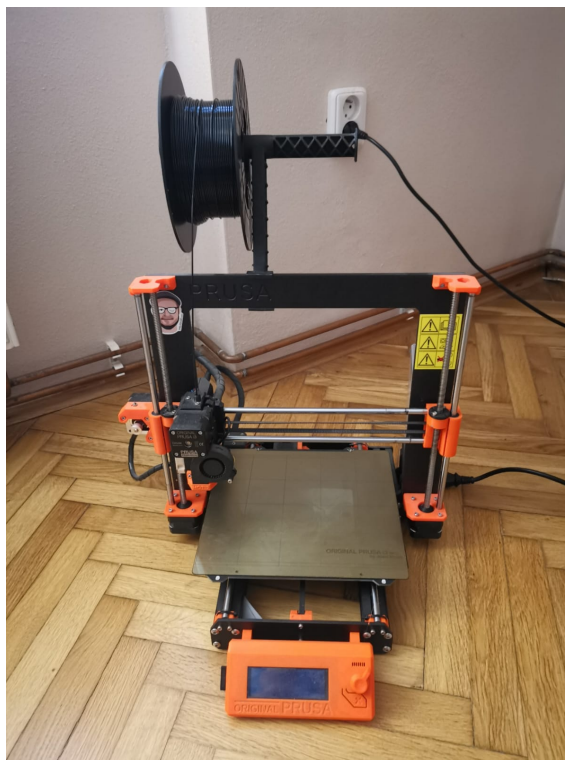
Cílem diplomové práce bylo vytvořit pomocí 3D tiskárny modely ve tvaru tyče ze čtyř vybraných materiálů (ABS, ASA, PLA, PETG). Tyto materiály poté vystavit vlivům prostředí s pokojovou teplotou, sníženou teplotou, zvýšenou teplotou a UV zářením. Následně je otestovat pomocí tahové zkoušky a vyhodnotit výsledky.

Tisk Před tiskem výsledných modelů pro další pokusy byla provedena nejprve série testovacích tisků ze všech materiálů. Tato testovací série měla za účel odhalit případné nedokonalosti tiskárny, dále to, jak se budou jednotlivé materiály při tisku chovat a zároveň také k nastavení optimálních parametrů tisku.

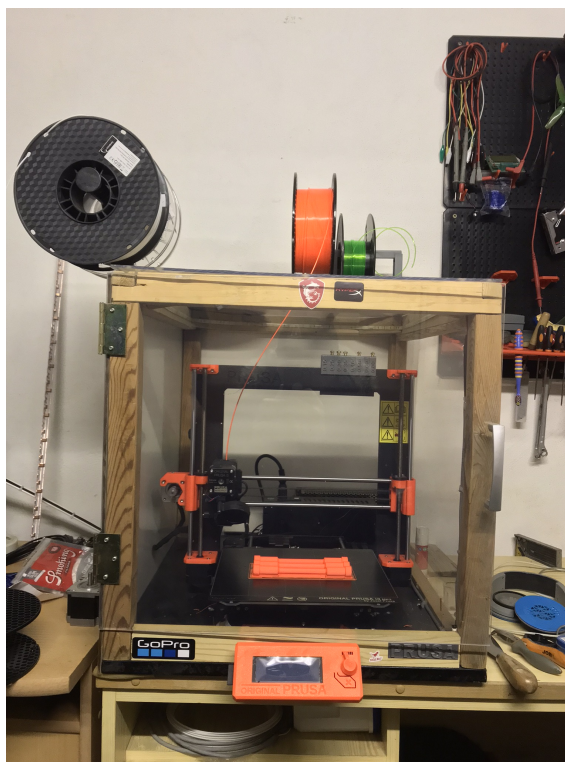
První problém nastal při prvním testovacím tisku z materiálu PLA. Tisk byl nedokonalý a na modelu byly patrné velké přebytky materiálu. Po dokončení tisku byla na extruderu diagnostikována tryska. Ta měla mít průměr 0,40 mm. Po jejím změření bylo zjištěno, že její aktuální průměr byl 0,46 mm. Byla tedy demontována a na její místo byla osazena nová, konkrétně model E3D V6 tryska 0.4 mm od firmy Průša Research. Po této výměně byl opět proveden testovací tisk. I zde byly patrné mírné přetoky materiálu, ne však tak znatelné jako před výměnou trysky za novou. Tyto přetoky byly vyřešeny pomocí ubrání hodnoty výplně ze 100% na 98%. S touto hodnotou výplně byly poté tisknuty všechny modely ze všech čtyř materiálů.

Další problém nastal při tisku z materiálu ABS. Tento materiál je náchylný na kroucení během tisku, to způsobuje jeho velká tepelná roztažnost. Materiál ve spodních vrstvách chladnul příliš rychle, což způsobovalo jeho kroucení a odlepování od podložky. Tento problém byl zjištěn i u materiálu ASA. Při prvních testovacích výtiscích, u materiálu ASA, byl problém vyřešen poměrně jednoduše, a to použitím lepidla pro 3D tisk. Bylo použito lepidlo 3D Glue od firmy 3D factorie. Ovšem u materiálu ABS toto řešení nepomohlo a nepomohlo ani zvýšení teploty platformy. Na 3D tiskárnu musel být tedy vyroben box kvůli udržení vyšší okolní teploty a tím i snížení chladnutí vrstev. Box byl vytvořen pomocí dřevěných hranolů a plexiskla, viz. obrázky 5.1 a 5.2. Při prvním testovacím tisku v tomto boxu bylo zjištěno, že problém byl zcela odstraněn. Všechny následující tisky již byly prováděny v tomto boxu.

Aby se zamezilo nekvalitnímu tisku z důvodu nějaké vady na filamentu, byly použity všechny filamenty od značky Průša Research. Tyto filamenty jsou podle mého názoru jedny z nejkvalitnějších na trhu. U všech materiálů tedy byly dodržovány teploty tisku a platformy podle výrobce filamentu. Ovšem u materiálu PETG nastal problém s příliš velkým stringováním, tento materiál je na něj náchylný. Teplota tisku byla zvýšena z 240 °C na 250 °C. Tímto zvednutím teploty tisku bylo dosaženo minimálního stringování a problém tím byl vyřešen.



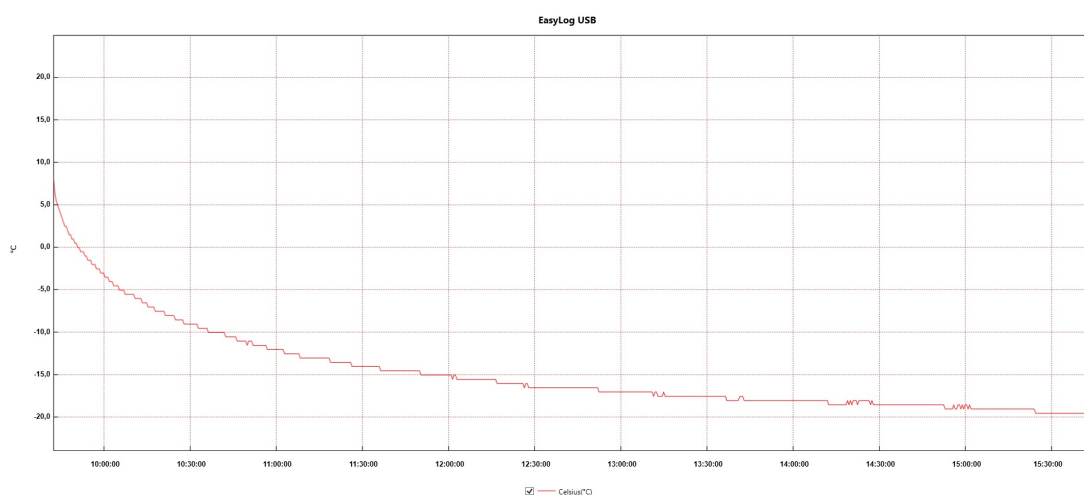
Obrázek 5.1: 3D tiskárna bez boxu



Obrázek 5.2: 3D tiskárna s vyrobeným boxem

Testování pomocí prostředí Při testování vlivů prostředí byly modely rozříděny do čtyř skupin Normal, Frost, Heat a UV. Každá skupina obsahovala 10 modelů od každého materiálu.

Během pokusu se skupinou Frost byly modely umístěny do mrazáku, ve kterém se teplota pohybovala okolo $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota během pokusu byla zaznamenávána pomocí datalogeru Lascar EL-USB-TC-LCD a teplotní sondou Greisinger GTF 300. Tato sonda byla umístěna na jeden z modelů. Modely byly uloženy do kartonové krabice a ta byla následně vložena do mrazáku viz. obrázek 5.4, v němž zůstaly po dobu 6 hod. Za tuto dobu teplota v krabici postupně klesala a po uplynutí 6 hod. klesla až na hodnotu $-19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, průměrná teplota pokusu byla $-14,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ viz. obrázek 5.3. Byla zde pravděpodobně udělána chyba, protože kartonová krabice fungovala jako izolace a chlad k modelům prostupoval pomaleji. Tím pádem nebylo dosaženo šokového zchlazení a minimalizoval se tak i čas působení minimální teploty na model. Kdyby byly modely v mrazáku uloženy v otevřené nádobě, pravděpodobně by těchto aspektů bylo dosaženo. Zprvu se nabízela i varianta volného vložení modelů do mrazáku, ta byla ovšem později zamítnuta. Hrozilo, že by modely přimrzly a při jejich vyjmutí by hrozilo jejich poškození.



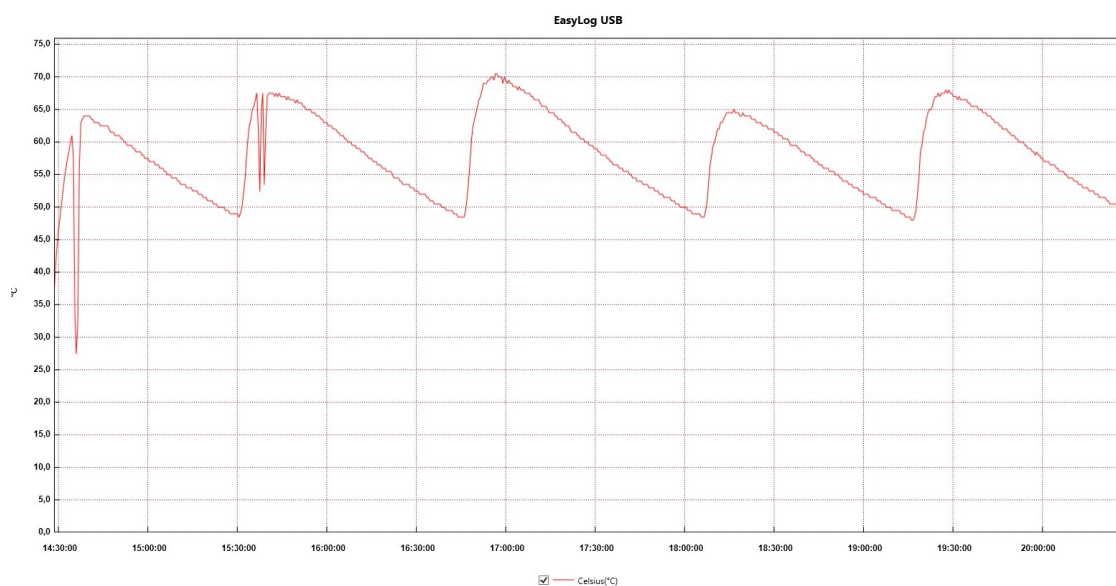
Obrázek 5.3: Výsledný graf teplot skupiny Frost

Při pokusu se skupinou Heat se objevil problém s teplotou trouby, do které byly modely vloženy viz. obrázek 5.6. Dle metodiky měla být nastavena teplota na konstantních $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při zkušebním testování, ještě před samotným testem s modely, byla tato nejnižší možná teplota nastavena. K měření byl opět použit dataloger Lascar EL-USB-TC-LCD s teplotní sondou Greisinger GTF 300 jako u pokusu v mrazáku. Podle dataloggeru bylo zjištěno, že při nastavení $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ je uvnitř trouby reálně okolo $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Použití jiné trouby nebylo momentálně možné, takže pokus musel pokračovat s touto. Z tohoto důvodu byl proces pokusu lehce upraven. Když se teplota v troubě blížila hranici $62\text{ }^{\circ}\text{C}$, byla trouba vypnuta. Po vypnutí se vždy ještě teplota mírně zvýšila a poté pomalu klesala. Když teplota klesla na hranici $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, byla trouba opět zapnuta. Tento proces se opakoval, až do té doby, než uplynula doba 6 hod., během kterých měl pokus probíhat. V průběhu celého pokusu teplota klesla na nejnižší hodnotu $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ z důvodu spadnutí jednoho z modelů. Bylo totiž nutné otevřít troubu a srovnat ho, hrozila totiž jeho následná deformace. Naopak nejvyšší teplota byla zaznamenána $70,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, z důvodu pozdního vypnutí trouby. Navzdory těmto



Obrázek 5.4: Umístění skupiny Frost do mrazáku

odchylkám byla během celého pokusu naměřena průměrná teplota 57,9 °C, která je patrná na obrázku 5.5. Modely z materiálu PLA byly na konci testu mírně zdeformovány. Tyto deformace bylo možné ručně srovnat. Ihned po skončení pokusu byl materiál ještě tvárný a nebyl to velký problém.



Obrázek 5.5: Výsledný graf teplot skupiny Heat



Obrázek 5.6: Umístění skupiny Heat do trouby

Výsledky Během vyhodnocování výsledků z tahové zkoušky bylo zjištěno, že největší pevností v tahu disponuje materiál PLA. Po pokusu se zvýšenou teplotou se tato pevnost ještě zvýšila na průměrnou hodnotu 2629,16 N. Tato hodnota byla nejvyšší ze všech testovaných materiálů. Zároveň zde byl i největší rozdíl oproti skupině Normal ze všech, konkrétně o 147,86 N. Takto dobrých výsledků bylo patrně dosaženo v důsledku překročení teploty 65 °C během pokusu se skupinou Heat, jelikož web zabývající se 3D tiskem www.materialpro3d.cz uvádí, že při teplotě 65 °C u materiálu PLA nastává deformace. Během pokusu bylo dosaženo ještě o 6,5 °C více než je tato hranice. Dá se proto tedy předpokládat, že díky takto vysoké teplotě převyšující hranici deformovatelnosti nastalo téměř dokonalé slití jednotlivých tiskových vrstev. To mělo za následek takto dobré tahové vlastnosti.

Podle webu www.materialpro3d.cz má materiál PETG také poměrně nízkou teplotu deformovatelnosti. U toho materiálu se uvádí 70 °C. To znamená, že během pokusu bylo této teploty také dosaženo a zároveň byla o 0,5 °C překročena. Oproti PLA nedosahovalo PETG ve skupině Heat tak dobrých výsledků, ale i tak bylo zaznamenáno zlepšení oproti skupině Normal o 8,82 N. U dalších dvou testovaných materiálů ABS a ASA bylo naopak zaznamenáno zhoršení oproti skupině Normal. Skupina Heat u obou zmínovaných materiálů dosáhla nejnižší pevnosti v tahu. U ABS bylo zhoršení o 18,16 N a u materiálu ASA dokonce o 49,62 N. Bylo to zřejmě zapříčiněno tím, že materiál ASA má hranici deformovatelnosti při 93 °C a ABS dokonce až 100 °C. Těchto teplot nebylo dosaženo, tudíž nenastalo již zmíněné slití tiskových vrstev. Kdyby se každý materiál testoval při teplotě blízké se jeho hranici deformovatelnosti, mohly být výsledky jiné.

Z výsledků tahové zkoušky bylo zjištěno, že pomocí UV záření u materiálů ABS a ASA lze dosáhnout vyšší pevnosti v tahu. Tyto materiály se během pokusu díky UV záření

vytvdily a dosáhly lepších výsledků než skupina Normal. Tento pokus je patrný na obrázku č. 5.7. U materiálu PLA bylo zaznamenáno snížení pevnosti v tahu oproti skupině Normal o 123,9 N. Výrobce filamentu Průša Research na svém webu www.prusa3d.com uvádí, že tento materiál má nízkou odolnost proti UV záření. Toho snížení pevnosti proto bylo očekáváno, ne však v tak velké míře.



Obrázek 5.7: Skupina UV během pokusu

U materiálu PETG ve skupině UV se objevil jeden zajímavý výsledek. Celkově bylo PETG UV zářením ovlivněno negativně, oproti normálu o 19,18 N, ale model se ser. č. 9 byl ovlivněn více oproti ostatním. Ostatní modely měly výsledky max. tahové síly okolo 2250 N, ale tento model s číslem 9 měl pouze 1797,53 N. Při výstupové kontrole u tohoto modelu nebyla shledána žádná vada. To znamená, že tento výsledek může mít za následek působení UV záření. Během pokusu s UV lampou, který trval 12 hod, byly modely každé 3 hodiny umístěny na jiné místo pod lampou a pootočený o 90°. Mělo se tím zamezit tomu, že některé modely, například na okraji ozářeného prostoru, budou zasaženy menší intenzitou UV záření než ostatní. Na tento konkrétní model (ser.č. 9) bylo zřejmě zapomenuto a mohl tak zůstat po celou dobu pokusu na místě s větší intenzitou UV záření.

Pokus s PETG Nepodařilo se dohledat žádné informace o vlivu mrazu na pevnost materiálu PETG. Z tohoto důvodu byly výsledky skupiny Frost u tohoto materiálu zajímavým zjištěním. Tahovou zkouškou bylo zjištěno, že modely z materiálu PETG, které byly vystaveny mrazu, disponovaly větší pevností v tahu, než modely neovlivněné žádným specifickým prostředím. Skupina Frost dosáhla oproti skupině Normal o 26,26 N větší pevnosti v tahu. Toto zjištění bylo natolik zajímavé, že byl proveden další pokus. Cílem tohoto pokusu bylo zjistit, zda delším působením mrazu na modely lze dosáhnout ještě vyšší pevnosti. K tomuto pokusu bylo použito pět modelů z materiálu PETG. Ty byly následně

vloženy do mrazáku v otevřené nádobě. Teplota byla opět měřena pomocí datalogeru Lascar EL-USB-TC-LCD s teplotní sondou Greisinger GTF 300 jako v předchozích pokusech. Ovšem modely při tomto pokusu byly vystaveny mrazu po dobu 48 hod. Po uplynutí této doby byly modely ponechány dalších 48 hod. v pokojové teplotě. Následně byly pomocí zkušebního stroje Shimadzu otestovány na tah. Z výsledků tohoto pokusu je patrné, že delší doba působení mrazu není přímo úměrná navýšení tahové síly. Naopak tato delší doba zapříčinila, že průměrná maximální síla u této skupiny Frost 2 činila 2182,95 N. To znamená, že dopadla ze všech skupin z materiálu PETG nejhůře. Oproti původní skupině Frost byla max. síla nižší o 64,85 N. Může to tedy znamenat, že určitou dobu působení mrazu přispívá ke zvýšení pevnosti materiálu, ale po překročení této doby pevnost klesá. Pro ověření těchto výsledků, by bylo nutné provést další experimenty. Roztrhané modely a detail místa roztržení skupiny Frost z materiálu PETG jsou zobrazeny na obrázcích 5.8 a 5.9.



Obrázek 5.8: Roztrhané modely skupiny PETG Frost



Obrázek 5.9: Detail místa roztržení

Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvořit modely za pomoci 3D tisku z různých materiálů filamentu, následně je vystavit vybraným vlivům prostředí a zhodnotit jejich pevnostní charakteristiky. Byly vybrány materiály ABS, ASA, PLA a PETG. Prostor bylo zvoleno neutrální s pokojovou teplotou, sníženou teplotou, zvýšenou teplotou a UV zářením. Modely byly poté rozděleny do skupin podle testovaného prostředí (Normal, Frost, Heat, UV). Materiály ve skupině byly zastoupeny deseti kusy každého z nich. Následně byly provedeny s jednotlivými skupinami pokusy, po kterých následovala tahová zkouška pro získání pevnostních charakteristik modelů. Poté byly tyto charakteristiky vyhodnoceny a byly z nich vyvozeny výsledky.

První část diplomové práce tvoří přehled technologií 3D tisku a jeho parametrů, které byly v následujících pokusech použity. Druhá část práce se zabývá procesem 3D tisku a samotných pokusů s modely.

Při vyhodnocení výsledku bylo zjištěno, že nejpevnější materiál ze všech testovaných, byl materiál PLA. Tento materiál dosahoval ve skupině Normal hodnoty 2481,30 N. Pokus se zvýšenou teplotou dokázal tuto průměrnou hodnotu zvýšit o 147,86 N na celkových 2629,16 N. Tato průměrná hodnota skupiny Heat odpovídá tahovému zatížení 268,10 Kg. Úplně nejlepšího výsledku ze všech skupin a materiálů dosáhl model se ser. č. 2, také z materiálu PLA a skupiny Heat. Tento model disponoval max. tahovou silou o hodnotě 2681,19 N = 273,41 N při průměru modelu 8 mm. Zároveň u materiálu PLA byl zaznamenán i největší rozdíl mezi nejpevnější (Heat) a nejslabší (Frost) skupinou. Tento rozdíl činil 303,32 N. Nejvíce ze všech materiálů byla ovlivněna skupina Frost, také u materiálu PLA. Oproti skupině Normal se během pokusu se sníženou teplotou snížila max. průměrná síla o 155,46 N. U ostatních materiálů nebyly rozdíly mezi jednotlivými skupinami tak velké, jako právě u PLA.

U skupiny Frost a materiálu PETG byla zjištěna zajímavá věc. Po pokusu se sníženou teplotou tento materiál vykazoval zlepšení max. průměrné síly o 26,26 N. Toto zjištění bylo natolik překvapivé, že byl proveden další pokus. Ten probíhal podle stejné metodiky jako skupina Frost, pouze s tím rozdílem, že bylo použito pět testovacích modelů a pokus trval 48 hod. Výsledky tohoto testu ovšem ukázaly, že když je materiál PETG vystaven mrazu delší dobu, tak degraduje a ztrácí pevnost. Tento pokus a jeho výsledky jsou podrobněji popsány v diskusi práce. Materiály ABS a ASA se během pokusů chovaly velmi podobně. Z výsledků je patrné, že ASA je vylepšeným materiálem ABS. ASA dosahovala větší pevnosti a menšího zdvihu. U obou materiálů bylo zaznamenáno vytvrzení během pokusu s UV zářením. Skupina UV u obou materiálů měla nejvyšší max. průměrnou sílu. U ABS tato hodnota činila 1681,92 N a u materiálu ASA byla tato hodnota 1843,24 N. Naopak nejslabší skupinou u těchto dvou materiálů byla skupina Heat. ASA zaznamenala pokles síly oproti normálu o 49,62 N, ABS pouze o 19,15 N.

Výsledky práce odhalily, jakému prostředí se s určitými materiály vyhnout a zamezit tak jejich ztrátě pevnosti. Zároveň však ukazují i to, která prostředí jsou naopak pro určité materiály vhodná a zlepšují jejich vlastnosti. Tyto znalosti o prostředích a materiálech jsou velkým přínosem do praxe.

Seznam použitých zdrojů

- b3d online (2019). FFF/FDM 3D PRINT 101- Layer height, infill & support. [online]. [cit. 2022-04-11], Dostupné z: <https://www.b3d-online.com/blog-news/fffdm-3d-print-101-layer-height-infill-support>.
- Bartuněk, J. (2008). ABS. [online]. [cit. 2021-12-09], Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/VIP.zip>.
- Čech, J. (2020). *Zjišťování pevnostních charakteristik výrobků u 3D tisku*. Jihočeská univerzita, České Budějovice.
- Císař, D. (2019). Průvodce začátečníka po Slic3r Prusa Edition. [online]. [cit. 2022-03-05], Dostupné z: <https://josefprusa.cz/slicuj-jako-buh-pruvodce-zacatecnika-slic3r-prusa-edition/>.
- Davis, J. R. (2004). *Tensile Testing, 2nd Edition*. ASM International, Ohio. ISBN: 9781615030958.
- FilamentPM (2017). PET-G. [online]. [cit. 2022-03-22], Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/petg>.
- Forejt, M. a Píška, M. (2006). *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Akademické nakladatelství CERM, Brno. ISBN: 80-214-2374-9.
- Homola, J. (2013). PLA. [online]. [cit. 2021-11-20], Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/pla/>.
- Horne, R. a Hausman, K. K. (2017). *3D printing for dummies. 2nd edition*. NJ, Hoboken. ISBN: 978-1119386315.
- Hosford, W. F. (2005). *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN: 9780511810930.
- Ing. Müller, M. a Mgr. Petržela, Z. (2011). Strojírenská technologie Část I.-II. [online]. [cit. 2021-12-20], Dostupné z: <http://www.soje.cz/skola/studijni-materialy/item/174-strojni-mechanik>.
- Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., a Bowyer, A. (2011). RepRap – the replicating rapid prototyper robotica. [online]. [cit. 2021-11-29], Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S026357471000069X.
- Kloski, L. W. a Kloski, N. (2017). *Začínáme s 3D tiskem*. Computer Press, Brno. ISBN: 78-802-5148-761.

- Machek, V. (2014). *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. České vysoké učení technické, Praha. ISBN: 978-80-01-05527-4.
- MaterialPro3D (2019). ASA. [online]. [cit. 2021-10-20], Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovyslovník/asa/>.
- O'Neal, B. (2019). ABS: Researchers Test Temperature & Speed Settings in FDM 3D Printing. [online]. [cit. 2022-04-05], Dostupné z: <https://3dprint.com/236571/abs-researchers-test-temperature-speed-parameters-3d-printing/>.
- Pecina, P. a Pecina, J. (2006). *Materiály a technologie – plasty: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. Masarykova univerzita, Brno. ISBN: 80-210-4100-5.
- Prusa, J. (2016). Kniha zaklady 3d tisku od Josefa Prusi. Prusa Research s.r.o. - 3D tisk a 3D tiskarny od Josefa Prusi. [online]. [cit. 2021-09-15], Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi>.
- Pruša, J. (2019). Průvodce materiály Prusa3d.cz. [online]. [cit. 2021-12-09], Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>.
- Prusament (2019). Prusament PETG. [online]. [cit. 2021-12-09], Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>.
- Redwood, B., Schöffner, F., a Garret, B. (2017). *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. 3D Hubs, Amsterdam. ISBN: 978-90-827485-0-5.
- Shingley, J. E., Mischke, C. R., a Budynas, R. G. (2010). *Konstruování strojních součástí*. VUTUM, Brno. ISBN: 978-80-214-2629-0.
- Tractus (2019). PETG Material. [online]. [cit. 2021-12-09], Dostupné z: <https://tractus3d.com/materials/petg/>.

Seznam obrázků

1.1	Princip FFF tisku,	9
1.2	Vzhled a hustota výplně	14
2.1	Universální zkušební stroj	17
2.2	Pracovní diagram a) s výraznou mezí kluzu b) s nevýraznou mezí kluzu .	18
3.1	Model zkušební tyče	20
3.2	Váha Kern 770	21
3.3	Univerzální trhací stroj Shimadzu AG-X Plus 50 kN	23
5.1	3D tiskárna bez boxu	33
5.2	3D tiskárna s vyrobeným boxem	33
5.3	Výsledný graf teplot skupiny Frost	34
5.4	Umístění skupiny Frost do mrazáku	35
5.5	Výsledný graf teplot skupiny Heat	35
5.6	Umístění skupiny Heat do trouby	36
5.7	Skupina UV během pokusu	37
5.8	Roztrhané modely skupiny PETG Frost	38
5.9	Detail místa roztžení	38

Seznam tabulek

1.1	Základní vlastnosti materiálu PLA	10
1.2	Základní vlastnosti materiálu PETG	11
1.3	Základní vlastnosti materiálu ABS	12
1.4	Základní vlastnosti materiálu ASA	12
3.1	Teploty tisku a platformy	21
4.1	Normal – Hmotnosti [g] modelů z výstupní kontroly	24
4.2	Frost – Hmotnosti [g] modelů z výstupní kontroly	25
4.3	Heat – Hmotnosti [g] modelů z výstupní kontroly	25
4.4	UV – Hmotnosti [g] modelů z výstupní kontroly	26
4.5	ABS – Normal	27
4.6	ABS – Frost	27
4.7	ABS – Heat	27
4.8	ABS – UV	27
4.9	ASA – Normal	28
4.10	ASA – Frost	28
4.11	ASA – Heat	28
4.12	ASA – UV	29
4.13	PETG – Normal	29
4.14	PETG – Frost	29
4.15	PETG – Heat	30
4.16	PETG – UV	30
4.17	PLA – Normal	31
4.18	PLA – Frost	31
4.19	PLA – Heat	31
4.20	PLA – UV	31